ChinaXiv合作期刊

信号组合对周期性射流冲击换热的影响

耿丽萍 周静伟 郑传波
（中国计量学院热能工程系，杭州 310018）

摘要：利用信号发生器控制质量流量控制仪来产生波形和频率可调的周期性变化的非稳态射流，实验研究了由标准矩形、正弦、锯齿和跳变脉冲信号组合产生的周期性波形的冲击换热性能，频率范围 1.25 Hz～20 Hz。研究表明，信号组合后的非稳态射流对平板换热的平均换热系数有一定影响，射流冲击换热的无量纲平均 *Nu* 数在滞止点及其周围的改变主要取决于信号的变化规律和变化的频率；跳变信号的加入可以在一定程度上增加被冲击平板的平均 *Nu* 数；组合的正弦矩形和锯齿矩形非稳态射流在频率增加到 10 Hz 之后可以获得比稳态射流增强的换热效果。

关键词：周期性　组合信号　频率　射流冲击　*Nu* 数

中图分类号：TK124　　　　**文献标识码：**A

Influence of Signal Combination to Heat Transfer Characteristics for Periodical Impinging Jet

GENG Li-Ping　　ZHOU Jing-Wei　　ZHENG Chuan-Bo

(Department of Thermal Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Experiments are conducted in which periodic air jets with combinational signals are applied to a heated surface in order to study heat transfer characteristics. The periodical jets are produced by a signal generator and a mass flow rate controller. The experiments are performed for combinations of rectangular, sinusoidal, saw-toothed and pulsed jet at frequencies from 1.25 to 20 Hz. Combinational signals show some kind of influence to the average heat transfer coefficient of unsteady impinging jet. The variations of non-dimensional average Nusselt number in stagnation point and around depend mainly on the change of unsteady inlet signals and frequency. The existence of the sudden increase or decrease in a signal can improve the average Nusselt number to some extend. Compared to a steady jet, the combinational unsteady inlet signals, including sinusoidal and saw-toothed signals combine with rectangular signal separately, can obtain enhanced heat transfer results after the frequency increased to10Hz.

Keywords: periodicity; combinational signal; frequency; impinging jet; Nusselt number

0 引言

当流体在压差的作用下以一定的速度通过喷嘴，冲击到被冷却或被加热物体的表面上时，就形成了射流冲击。射流流程短，冲击滞止区会形成非常薄的边界层，因此具有非常高的局部传热系数，在工业领域中得到了广泛的运用，如飞机机翼除冰、高负荷微电子元件冷却、玻璃回火、金属薄板退火等等[1]，国内外众多学者对影响射流冲击换热的因素进行了研究探索[2-4]。

随着工业技术的发展，普通稳态直射流的强化换热能力有限，已经不能满足特定条件下的换热要求，因此近来许多学者通过改变喷嘴的结构，增强射流的湍流度，利用自激励振荡射流[3]或旋进射流[4]冲击传热，但有效增强换热的报道并不多见。随着控制技术的发展，研究者用典型的周期性射流进行实验试图强化换热[5]，但不同的研究者得出的结论往往不一致，甚至是相反的，如 AZEVEDO 等[6]利用脉冲射流进行实验指出,所有频率下脉冲射流传热相比稳定射流均削弱 0～20%。不少研究者发现周期性射流能否强化换热和射流的参数有很大的关系，如 HOFMAN 等人[7] 发现只有在高频率、小的冲击高度时换热才会强化，周静伟[7]等利用质量流量控制装置产生典型的周期性射流进行实验，研究得出非稳态射流均存在一个频率阈值，大于某一阈值时，换热效果能得到强化。由此可见，影响周期性射流冲击换热的因素十分复杂，对周期性射流冲击换热的研究还有待进一步深入。

本文利用信号发生器，控制质量流量控制仪来

基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.51206153）

chinaXiv:201711.00650v1

chinaXiv:201711.00650v1

产生频率、波形可调的周期性组合信号射流来进行冲击换热的实验研究，并与稳态及典型射流的换热效果进行了对比。

1 实验系统

射流冲击的实验系统如图 1 所示，它由高压气源与管路系统，质量流量控制系统，换热板及电加热系统，数据采集系统组成。空气经过压缩机压缩、过滤、节流后，再经过流量计和质量流量控制仪，最后从喷嘴流出对具有恒热流密度的换热板进行冲击换热。

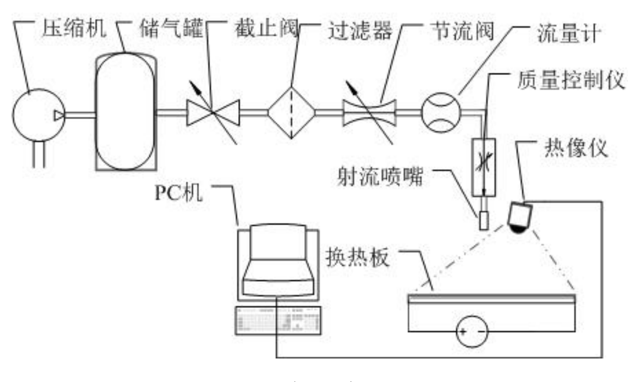


图 1 实验系统图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental set-up

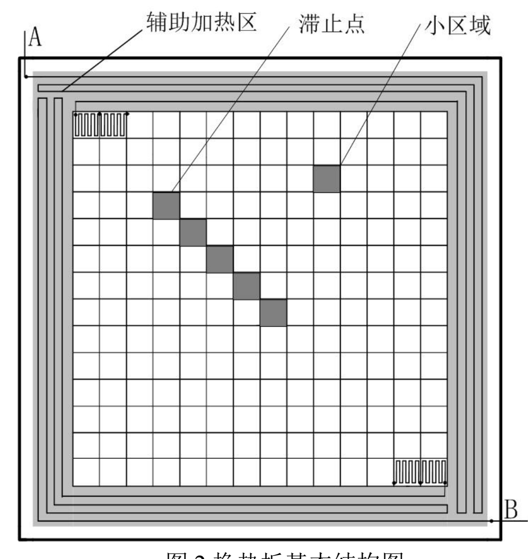


图 2 换热板基本结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the heating plate

质量流量控制装置是本实验的核心部件，它可以根据信号发生器输入的信号来改变流量的大小，响应速度达到毫秒级，因此，可以输出任意形状的波形信号，其输出气流的量程范围是 0～179.83 L/min,最高响应频率可达 125 Hz。

实验中冲击换热板如图 2 所示，其表面均匀覆有电热铜箔导线，通过电热导线产生热量来提供恒热流密度条件。换热板上的温度分布通过红外热像仪采集，热像仪的热灵敏度小于 0.07 ºC。最后使用红外处理软件，对红外图像进行详细处理，得到所需的温度场和换热板上的 *Nu* 数分布情况。

2 实验参数说明

本文实验中，换热板的对流换热系数 *h*、努塞数 *Nu* 和冲击射流雷诺数 *Re* 定义为:

$$h = \frac{q_W}{(T_W - T_f)} \quad (1)$$

$$q_W = q_e - q_r - q_c \quad (2)$$

$$Nu = h D / \lambda \quad (3)$$

$$Re = 4Q / \pi D v \quad (4)$$

式中 q_W 是换热板的热流密度，数值上等于换热板在考虑辐射和传导损失后的平均加热功率，Q 为实验中射流的质量流量，本文中组合信号射流的平均质量流量均保持恒定，v 为冷却空气的运动黏度，T_w 为换热板的温度，T_f 为射流的温度。

对周期性的信号而言，频率是一个主要参数，实验中采用的频率为1.25 Hz、2.5 Hz、5 Hz、10 Hz、20 Hz。实验中的其他一些参数如下：射流喷嘴的内径为D=15 mm，喷管出口离开传热平板的高度H=6D，换热板提供的恒热流密度为380 W/m^2。

文中，除了频率变化，主要考虑了几种组合波形对换热效果的影响。这几种组合波形分别由正弦（*sin*）、矩形（*rec*)、锯齿（*saw*）以及跳变脉冲(*pul*)组合而成，组合方式汇总见表 1。

表 1　组合信号汇总

Table 1 Summary of combinational signals

序号	组合信号	表示方式
I	正弦矩形组合	*sin+rec*
II	矩形正弦组合	*rec+sin*
III	锯齿矩形组合	*saw+rec*
IV	矩形锯齿组合	*rec+saw*
V	脉冲锯齿组合	*pul+saw*
VI	锯齿脉冲组合	*saw+pul*

这些波形各有特点，表 1 的组合波中既有变化舒缓不定的正弦波形，又有变化率一定的锯齿信号；既有速度位于最高或最低的稳定信号，又有速度的脉冲突变，研究这些不同变化方式的阶段组合对冲击效果的影响很有意义。

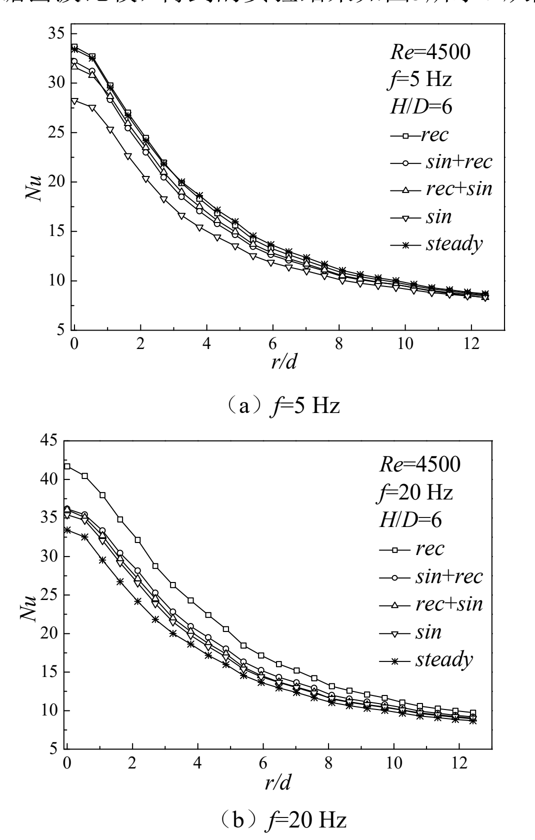
3 实验结果及分析

chinaXiv:201711.00650v1

3.1 波形对换热效果的影响

对I-IV组合而成的周期性射流在相同的高度(H/D=6)和雷诺数(Re=4500)下进行冲击换热实验，并与稳态、典型的周期性射流进行对比，其结果如图3、4所示，从图中可以看出，组合周期性射流的换热效果均介于两组成波形之间，变化过程较平缓的正弦和锯齿形射流，组合了矩形信号后，换热效果有所增强，这是因为平缓变化的射流其湍流程度较小，而含跳变的射流信号湍流度相对较大，导致跳变的射流会发生急剧的振荡，产生很强的冲击效应，促使边界层变薄，从而达到强化换热的效果。但组合波信号仍然不及典型矩形波的冲击换热效果。同时可以看出，频率为20 Hz时的换热明显强于5 Hz时的效果，因此，后文还研究了频率对平均Nu数的影响。

随后，对组合波V、VI进行实验，并与标准对称锯齿波比较，得到的实验结果如图5所示。从图中

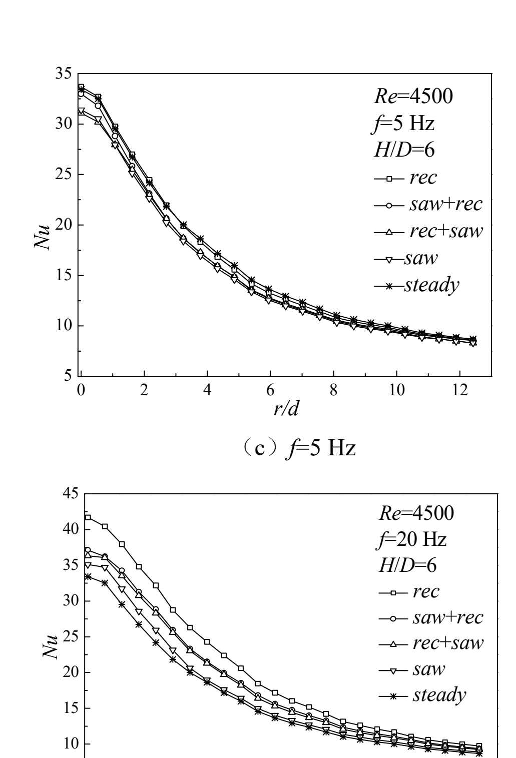


（a）f=5 Hz

（b）f=20 Hz

图 3 矩形正弦组合在换热板上的 Nu 数分布情况

Fig. 3 Nusselt number on radial direction for sinusoidal and rectangular signal combination

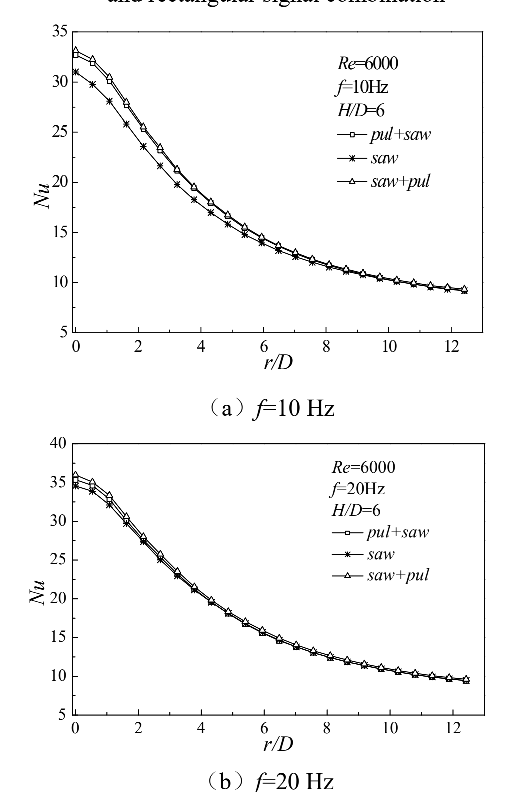


（c）f=5 Hz

（d）f=20 Hz

图 4 矩形锯齿组合在换热板上的 Nu 数分布情况

Fig. 4 Nusselt number on radial direction for saw-toothed and rectangular signal combination



（a）f=10 Hz

（b）f=20 Hz

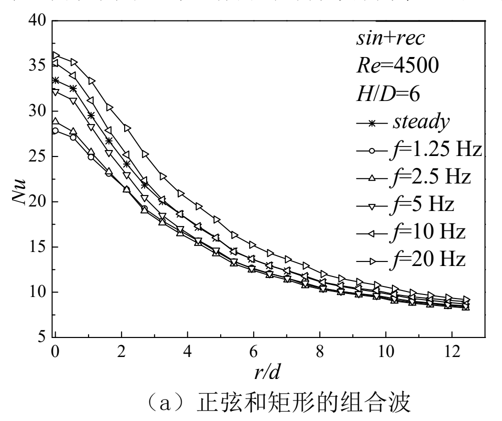
图 5 锯齿脉冲组合在换热板上的 Nu 数分布情况

Fig. 5 Nusselt number on radial direction for saw-toothed and pulsed signal combination

可以看出，信号中跳变脉冲的存在使得冲击换热效果比对称的典型锯齿信号有所增强，这两种组合波在频率变化时对换热的影响基本保持一致，但随着频率的增加，这种增强效果相对减弱。

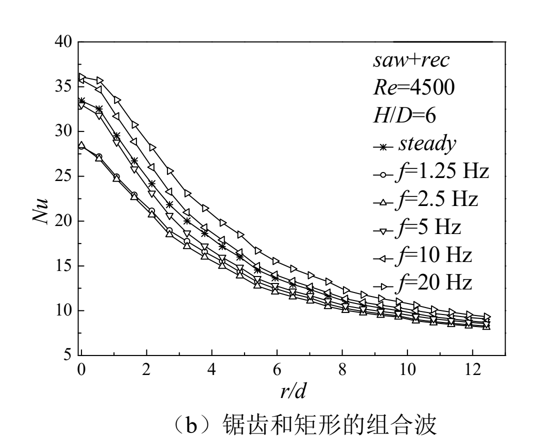
3. 2频率对换热效果的影响

如前所述，频率是影响周期性冲击射流换热效果的一个重要因素，图 6(a)、(b)给出了不同频率下 I、III 两种组合波周期信号在 *H*/*D*=6、*Re*=4500 时沿径向的 *Nu* 数分布情况。可见，随着射流频率的增加，滞止区及其周围的 *Nu* 数逐渐增大，当频率大于 10 Hz 时，这两种组合波射流的换热效果优于稳态射流，这是由于频率越大，边界层发展时间越短，平均边界层就越薄，所以具有改善传热的可能性。



（a）正弦和矩形的组合波

(a) Sinusoidal and rectangular signal combination



（b）锯齿和矩形的组合波

(b) Saw-toothed and rectangular signal combination

图 6 不同频率下组合射流对 *Nu* 数分布影响

Fig. 6 Effects of combinational signals with different frequencies on Nusselt number

4 结论

（1）通过实验研究相同平均质量流量的组合信号射流冲击传热，发现不同波形信号下周期性变化的射流传热性能能够带来冲击平板平均*Nu*数的改变，这种平均换热效果的变化在一定程度上取决于射流信号的变化规律和变化的频率。

（2）组合信号的冲击换热介于组成该信号的典型周期信号的效果之间，跳变信号的加入可以在一定程度上增加被冲击平板的平均*Nu*数，但不能超越矩形信号的换热效果。

（3）组合的正弦矩形和锯齿矩形射流在频率增加到 10 Hz 之后可以获得比稳态射流增强的换热效果。

参考文献

[1] MA Chongfang. Jet Impinging Heat Transfer with or without Boiling [J]. Journal of Thermal Science, 1996, 5(2): 128-131.

[2] Koseoglu M F, Baskaya S. The Role of Jet Inlet Geometry in Impinging Jet Heat Transfer, Modeling and Experiments [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(8): 1417-1426.

[3] LIAO Zhenfang, LI Jun, CHEN Deshu, Theory and Experimental Study of the Self-excited Oscillation Pulsed Jet Nozzle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 16(4): 379-383.

[4] Nuntadusit C, Wae-hayee M, Bunyajitradulya A, et al. Visualization of Flow and Heat Transfer Characteristics for Swirling Impinging Jet [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(3): 640-648.

[5] XU Peng, YU Boming, QIU Shuxia, et al. Turbulent Impinging Jet Heat Transfer Enhancement due to Intermittent Pulsation [J]. International Journal of Thermal Science, 2010, 49(7): 1247-1252.

[6] Azevedo L F. A, Webb B W. Queiroz M. Pulsed Air Jet Impingement Heat Transfer [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1994, 8: 206-213.

[7] Hofman H M, Movlieanu D L, Kind M, et al. Influence of a Pulsation on Heat Transfer and Flow Structure in Submerged Impinging Jets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007, 50(17): 3638-36348.

[8] 周静伟，杨兴贤，耿丽萍等. 非稳态冲击射流强化传热实验研究[J]. 机械工程学报，2010，46(6): 144-148.

ZHOU Jingwei, YANG Xingxian, GENG Liping, et al. Experimental Investigation on Heat Transfer Augmentation with Unsteady Impinging Jet [J]. Journal of Mechnical Engineering，2010，46(6): 144-148.

chinaXiv:201711.00650v1